Sharif University of Technology

Sharif Mechanical Engineering Journal

https://sjme.journals.sharif.edu

Research Article

Numerical Study of the Effect of Combining Passive Flow Control Methods to Improve Cyclone Performance

Arman Moghadaszadeh and Saeed Karimian Aliabadi*

Faculty of Mechanical Engineering in Tarbiat Modares University
* Corresponding author:(karimian@modares.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 2 August 2025

Revised: 26 May 2026

Accepted: 10 June 2026

Keywords:

Cyclone,
numerical simulation,
flow control,
separation efficiency,
pressure drop,
particle diameter,
cut-off diameter.

Abstract

Cyclones play a crucial role in particle separation from fluid streams due to their high efficiency and low cost. In this study, the performance enhancement of a gas cyclone was investigated through step-by-step geometric modifications. These changes were aimed at improving flow guidance, reducing turbulence fluctuations, and increasing particle-wall interactions to improve overall cyclone performance, a concept referred to in this study as flow control. Initially, the Stairmand cyclone was selected as the baseline model, and its performance was analyzed using numerical simulations with the Reynolds Stress Model (RSM) and the Eulerian-Lagrangian approach in ANSYS Fluent software. A structured mesh was generated, adhering to quality criteria to ensure accurate results. The numerical model was validated against published experimental data, demonstrating good agreement with less than 10% error. Geometric modifications were applied to four main sections of the cyclone: the inlet, vortex finder, body, and collection section. The results showed that the 360-degree turning inlet design, by better guiding the flow and increasing particle-wall collisions, enhanced the separation efficiency by 11.52% and reduced the cut-off diameter by 12.14%, though it caused a 22.04% increase in pressure drop. The addition of a curved vortex finder reduced the pressure drop by 7.49% compared to the first modification and had a positive overall effect. Introducing a cylindrical vortex-stabilizing rod in the cyclone body reduced flow oscillations and further improved separation efficiency by 1.15% compared to the previous stage. Finally, the implementation of a reverse cone in the collection section enhanced fine-particle separation, reducing the cut-off diameter to 1.3 micrometers. These findings provide a foundation for further cyclone optimizations and highlight the potential for improving their performance in industrial applications.

Introduction

Cyclones are widely used for gas–solid separation in industries such as oil and gas, petrochemical, metallurgy, and mining due to their simple design, absence of moving parts, and low maintenance cost. Despite their structural simplicity, the internal flow is highly complex and strongly influenced by geometry, inlet conditions, and vortex dynamics. Cyclone performance is commonly described by collection efficiency, $\eta(D_p)$, and cut-off diameter, d_{50}, which represents the particle size collected with 50% efficiency. A smaller d_{50} indicates better fine-particle separation capability.

A major limitation of conventional cyclones is reduced efficiency for particles smaller than 5 μm, often accompanied by increased pressure drop when design modifications are introduced. Therefore, optimizing cyclone geometry to enhance separation performance while controlling pressure loss has become a central research focus.

Although traditional analytical models provide initial insight into cyclone behavior, modern computational fluid dynamics (CFD) enables more accurate analysis of internal flow structures. Unlike previous studies that modified individual components, the present study evaluates sequential and

To Cite this article:
Moghadaszadeh, A. and Karimian Aliabadi, S. 2026. Numerical study of the effect of combining passive flow control methods to improve cyclone performance, Sharif Mechanical Engineering Journal, **42**(1), 3-16.
https://doi.org/10.24200/j40.2026.67233.1740

E-ISSN: 2676-4733 © 2026 The Author(s). Sharif Mechanical Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

combined geometric modifications to the inlet, vortex finder, body, and dust collection sections to improve overall performance.

Methodology

A standard Stairmand high-efficiency cyclone was selected as the baseline geometry (Fig. 1). All geometric parameters were defined proportionally to the main body diameter according to conventional design ratios. The three-dimensional model was created in SolidWorks, prepared for simulation in SpaceClaim, and meshed using ICEM CFD, as illustrated in Fig. 2. A structured mesh was generated to improve numerical stability and solution accuracy.

The Reynolds Stress Model (RSM) with standard wall functions was employed to accurately capture the highly swirling and anisotropic turbulent flow inside the cyclone. Boundary conditions included a uniform inlet velocity of 16.1 m/s, a pressure outlet condition, and no-slip walls (Table 2). The SIMPLEC algorithm was used for pressure–velocity coupling, while the PRESTO scheme was applied for pressure discretization. Second-order upwind schemes were used for momentum and turbulence quantities, and first-order upwind was applied for Reynolds stress equations (Table 3).

A mesh independence study was conducted using grids ranging from 100,000 to 1.4 million cells. Results showed negligible variation in pressure drop and velocity profiles beyond approximately 500,000 cells (Fig. 3); this mesh size was therefore selected as optimal.

Model validation was performed by comparing axial and tangential velocity profiles at Z = 0.75D with experimental data (Figs. 4 and 5). Pressure drop predictions were validated at inlet velocities of 6, 10, 16.1, 20, and 25 m/s (Fig. 7). Additionally, particle separation efficiency was evaluated for a 0.3-m diameter cyclone using talc particles and compared with experimental results (Fig. 8). A particle number independence test (Fig. 9) confirmed numerical stability and justified the one-way coupling approach.

Results and Discussion

Four geometric modifications were sequentially applied to the baseline Stairmand cyclone, targeting the inlet, vortex finder, body, and dust collection section (Fig. 10). The objective was to control internal flow behavior, reduce turbulence intensity, stabilize the vortex core, and enhance particle–wall interaction.

In the first stage, implementing a 360° spiral inlet significantly improved flow guidance toward the cyclone wall. This modification increased collection efficiency by 11.52% and reduced the cut-off diameter by 12.14%, although pressure drop increased by 22.04% relative to the baseline model.

In the second stage, replacing the flat vortex finder roof with a curved design reduced the pressure drop by 7.49% compared to the previous stage, while maintaining similar separation performance.

The third modification involved adding a vortex stabilizer to the cyclone body. This reduced flow fluctuations in the core region and decreased the cut-off diameter to 1.39 μm. However, pressure drop increased by 15.14% relative to the baseline model.

Finally, introducing a twisted, inverted hybrid solid cone in the dust collection section enhanced fine-particle separation. Collection efficiency increased by 16.87%, and the cut-off diameter decreased to 1.3 μm, while pressure drop remained within an acceptable range. Although the effects were not strictly additive, the combined configuration resulted in overall performance improvement.

Conclusion

This study investigated the sequential application of four geometric modifications to a Stairmand cyclone using a validated CFD model. The results demonstrated that the 360° spiral inlet had the most significant influence on improving separation efficiency and reducing cut-off diameter, albeit at the expense of higher pressure drop. Subsequent modifications, including a curved vortex finder roof, vortex stabilizer, and twisted inverted hybrid cone, contributed to flow stabilization and enhanced fine-particle separation.

Although the interaction between modifications was not purely synergistic, the combined design achieved superior overall performance compared to the baseline model. The findings confirm that integrated geometric optimization of multiple cyclone components can provide a practical strategy for designing next-generation industrial cyclones with higher efficiency and controlled pressure drop.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

مجله علمی مهندسی مکانیک شریف

https://sjme.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

مطالعه‌ی عددی تأثیر ترکیب روش‌های کنترل جریان غیرفعال به منظور بهبود عملکرد سیکلون

آرمان مقدس‌زاده و سعید کریمیان علی‌آبادی *

گروه مهندسی هوافضا، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (Karimian@modares.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۵ /۰۳/۲۰

واژگان کلیدی:

سیکلون،

شبیه‌سازی عددی،

کنترل جریان،

بازده جداسازی،

افت فشار،

قطر ذرات،

قطر برش.

چکیده

سیکلون‌ها به‌دلیل کارایی بالا و هزینه‌ی پایین، نقش مهمی در جداسازی ذرات از جریان سیال ایفا می‌کنند. در پژوهش حاضر، بهبود عملکرد یک سیکلون گازی با استفاده از تغییرات مرحله‌به‌مرحله در طراحی هندسی آن بررسی شده است. هدف از تغییرات اخیر، بهبود هدایت جریان و افزایش برخورد ذرات با دیواره بوده است، که با عنوان کنترل جریان معرفی شده‌اند. ابتدا، سیکلون استیرمند به‌عنوان مدل پایه انتخاب و عملکرد آن از طریق شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) و روش اویلری-لاگرانژی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت تحلیل شده است. شبکه‌بندی به‌صورت سازمان‌یافته با رعایت معیارهای کیفیت شبکه انجام شده است. اعتبارسنجی مدل عددی با داده‌های تجربی منتشرشده صورت گرفته است، که انطباق خوبی با نتایج شبیه‌سازی نشان داده است (خطای کمتر از ۱۰٪). تغییرات طراحی در چهار بخش اصلی سیکلون، شامل: ورودی، گردابه‌یاب، بدنه، و بخش جمع‌آوری‌کننده اعمال شده است. نتایج نشان داده است که ورودی با چرخش ۳۶۰ درجه، با هدایت بهتر جریان و افزایش برخورد ذرات با دیواره، بازده جداسازی را ۱۱/۵۲٪ افزایش و قطر برش را ۱۲/۱۴٪ کاهش داده است، هر چند افت فشار به میزان ۲۲/۰۴٪ افزایش یافته است. افزودن گردابه‌یاب انحنادار، با کاهش ۷/۴۹٪ افت فشار نسبت به تغییر اول، تأثیر مثبتی در عملکرد کلی داشته است. اضافه‌کردن میله‌ی استوانه‌ای تثبیت‌کننده‌ی گردابه در بدنه‌ی سیکلون، با کاهش نوسان‌های جریان، بازده جداسازی را تا ۱/۱۵٪ نسبت به مرحله‌ی قبل افزایش داده است. نهایتاً، به‌کارگیری مخروط معکوس در بخش جمع‌آوری ذرات، منجر به بهبود در جداسازی ذرات ریز و کاهش قطر برش به ۱/۳ میکرومتر شده است. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند بستر مناسبی برای انجام بهینه‌سازی در سیکلون‌ها و ارتقاء عملکرد آن‌ها در کاربردهای صنعتی باشد.

۱. مقدمه

سیکلون[1] به‌عنوان یکی از تجهیزات پرکاربرد در فرآیند جداسازی ذرات جامد از گاز، در صنایع مختلف از جمله: نفت، گاز، پتروشیمی، متالوژی، و معدن استفاده می‌شود. علی‌رغم ساختار ساده، الگوی جریان درون آن‌ها بسیار پیچیده است و عملکرد آن‌ها به‌شدت تحت تأثیر طراحی هندسی، شرایط ورودی، و جریان گردابه‌ای قرار دارد. دلیل اصلی استقبال گسترده از تجهیزات مذکور، سادگی ساخت، نداشتن قطعات متحرک، هزینه‌ی تعمیر و نگهداری پایین، و ظرفیت بالای عملیاتی آن‌هاست. توانایی جداسازی یک سیکلون معمولاً از طریق راندمان جمع‌آوری یا قطر برش توصیف می‌شود. راندمان جمع‌آوری $\eta(D_p)$، به صورت نسبت جرم ذرات با قطر مشخص (D_p)، که توسط سیکلون جدا می‌شوند، به جرم همان ذرات در جریان ورودی تعریف می‌شود.

از سوی دیگر، قطر برش d_{50}، به قطری از ذرات گفته می‌شود که راندمان جمع‌آوری آن برابر با ۵۰٪ است، که هر چه مقدار d_{50} کوچک‌تر باشد، سیکلون توانایی بیشتری در جداسازی ذرات ریزتر خواهد داشت. یکی از چالش‌های مهم در استفاده از سیکلون‌ها، افت بازده در جداسازی ذرات ریز (کوچک‌تر از ۵ میکرومتر) و اتلاف انرژی ناشی از افت فشار است. به همین علت، طی سال‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای برای بهینه‌سازی عملکرد سیکلون‌ها از طریق اصلاح هندسه و ساختار آن‌ها انجام شده است.[1]

اولین امتیازنامه‌ی اختراع سیکلون گاز- جامد در سال ۱۸۸۵ توسط جان فینچ در ایالات متحده ثبت شده است. وی برای اولین بار از نیروی گریز از مرکز جهت جداسازی ذرات استفاده کرده است.[1] شفرد و لاپل[2] (۱۹۴۰)، تحلیل دقیقی از جریان گردابه‌ای در سیکلون ارائه و نشان داده‌اند که بازده جداسازی

[1] Cyclone

[2] Shepherd & Lapple

استناد به این مقاله:

مقدس‌زاده، آرمان و کریمیان علی‌آبادی ، سعید، ۱۴۰۵. مطالعه‌ی عددی تأثیر ترکیب روش‌های کنترل جریان غیرفعال به منظور بهبود عملکرد سیکلون. مهندسی مکانیک شریف، ۴۲(۱)، صص.۳-۱۶. https://doi.org/10.24200/j40.2026.67233.1740

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۴۷۳۳- ۲۶۷۶

ذرات مستقیماً به تعداد چرخش‌های جریان در داخل سیکلون وابسته است.[۲] در ادامه، لاپل (۱۹۵۰)، با بهره‌گیری از قانون استوکس برای ذرات کروی، مدلی برای پیش‌بینی بازده جداسازی و افت فشار سیکلون پیشنهاد داده است.[۳] الکساندر (۱۹۴۹)، یک مدل کاملاً تجربی برای محاسبه‌ی میدان سرعت توسعه داده است، که شامل تأثیر مستقیم دما نیز بوده است، هر چند قادر به لحاظ شکل ورودی در محاسبات نبوده است.[۴] استیرمند[۳] (۱۹۵۰)، نیز مدل بازده بالایی برای طراحی سیکلون معرفی کرده است، که تمرکز آن بر جداسازی ذرات ریز و کاهش افت فشار بوده و نسبت‌های هندسی خاصی را نیز برای طراحی پیشنهاد کرده است.[۵] بارث[۴] (۱۹۵۶)، با ارائه‌ی یک مدل نیمه‌تجربی، تأثیر هندسه‌ی ورودی را در قالب یک پارامتر جدید وارد معادلات کرده و همچنین روابطی برای طول گردابه و ضریب اصطکاک ارائه داده است.[۶] در ادامه، موشلناتز[۵] و همکارانش (۱۹۷۲)، با توسعه‌ی ایده‌ی بارث، نمودارهای تجربی را با روابط تحلیلی جایگزین و اثر غلظت جریان را نیز در مدل لحاظ کرده‌اند.[۷] رایدن و گووین[۶] (۱۹۸۱)، در پژوهشی نظری و تجربی، سعی در تعمیم مدل مؤلفه‌ی مماسی سرعت برای شرایط مختلف عملیاتی داشته‌اند.[۸] در همین راستا، مدل‌های لاپل و بارث را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی بازبینی کرده و نشان داده‌اند که هیچ‌کدام قادر به پیش‌بینی دقیق بازده نبوده‌اند، اما پارامتر قابل تنظیم مدل لاپل برای تطبیق بهتر قابل استفاده است.[۸] در سال‌های بعد، مایسنر و لافلر[۷] (۱۹۷۸)، مدل جدیدی برای توزیع سرعت مماسی ارائه داده‌اند، که امکان محاسبه‌ی مؤلفه‌های محوری و شعاعی را نیز فراهم می‌کرده است.[۹] یوزیا و لیث[۸] (۱۹۸۹ و ۱۹۹۰)، نیز پنج مدل مختلف از جمله بارث و لاپل را برای پیش‌بینی قطر برش بررسی کرده و با داده‌های تجربی تطبیق داده‌اند.[۱۰ و ۱۱] همچنین، رامچاندران[۹] و همکاران (۱۹۹۲)، با استفاده از مدل افت فشار دیرگو و بازده یوزیا- لیث، مسیر بهینه‌سازی طراحی سیکلون‌ها را براساس افت فشار و بازده تدوین کرده‌اند.[۱۲] از دهه‌ی ۱۹۸۰ به بعد، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)[۱۰] در تحلیل عملکرد سیکلون‌ها آغاز شده است، که در ادامه به مطالعات جدیدتر پرداخته و آن‌ها با توجه به اجزاء سیکلون که شامل: ورودی، خروجی هوای تمیز و گردابه‌یاب، بدنه، و بخش جمع‌آوری ذرات هستند، در ۴ تقسیم‌بندی ارائه شده‌اند.

در بخش ورودی، ژائو[۱۱] و همکاران (۲۰۱۹)، از ورودی مارپیچی یکپارچه (ICBC)[۱۲] برای افزایش بازده استفاده کرده و نتایج شبیه‌سازی با به کارگیری مدل آشفتگی (RSM)[۱۳] نشان داده است که روش مذکور به‌طور قابل‌توجهی بازده را افزایش و قطر برش d_{50} را کاهش می‌دهد.[۱۳] وسیلفسکی و برار[۱۴] (۲۰۱۹)، با بررسی زاویه‌ی ورودی نشان داده‌اند که تغییر زاویه‌ی ورودی، تأثیر اندکی در بازده دارد، اما افت فشار را افزایش می‌دهد.[۱۴] برار و همکاران (۲۰۲۴)، مطالعه‌ای دیگر با طراحی دو ورودی با ابعاد و موقعیت‌های مختلف، تغییرات قابل‌توجهی در بازده و افت فشار ثبت کرده‌اند.[۱۵] همچنین فنگ[۱۵] و همکاران (۲۰۲۴)، با معرفی نازل همگرا در ورودی، بازده را تا ۴۶٪ افزایش داده‌اند.[۱۶] در ادامه‌ی مطالعات، فتوگا[۱۶] (۲۰۲۳)، اثر زاویه‌ی شعاعی ورودی‌ها را نسبت به یکدیگر با پنج ورودی تحلیل و بیشترین بازده را برای زاویه‌ی ۶۱ درجه گزارش کرده است.[۱۷]

در بخش گردابه‌یاب، گیو[۱۷] و همکاران (۲۰۲۳)، نشان داده‌اند که گردابه‌یاب شکاف‌دار (SVF)[۱۸] می‌تواند افت فشار را تا ۲۰٪ و قطر برش را تا ۴/۲٪ کاهش دهند.[۱۸] لی و همکاران (۲۰۲۳)، با بررسی شکل و زاویه‌ی گردابه‌یاب و همچنین ساختار سقف سیکلون (ACR)[۱۹]، کاهش افت فشار و بهبود بازده تا ۲۵٪ را گزارش کرده‌اند.[۱۹ و ۲۰] کومار[۲۰] و همکارش (۲۰۱۹)، نیز با طراحی گردابه‌یاب همگرا- واگرا و بهینه‌سازی آن با الگوریتم ژنتیک، افت‌فشار را تا ۵۸٪ کاهش داده است.[۲۱] پی[۲۱] و همکاران (۲۰۱۷)، نشان داده‌اند که تیغه‌های داخل گردابه‌یاب می‌تواند افت فشار را تا ۱۶/۴٪ کاهش دهد.[۲۲]

در بخش بدنه، یانگ و همکاران (۲۰۲۳)، با نصب تیغه‌های مارپیچی مثلثی روی بدنه، کاهش ۳۰٪ قطر برش و افزایش بازده برای ذرات ۰/۱ تا ۳ میکرومتر را گزارش کرده‌اند.[۲۳] ژو و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از پره‌های مارپیچی راهنما نشان داده‌اند که چرخش آن‌ها، تأثیر قابل‌توجهی در مسیر جریان، کاهش آشفتگی، و افزایش بازده دارد.[۲۴] پندی و برار[۲۲] (۲۰۲۲) با بررسی اشکال مختلف مخروط پایینی بدنه، مشخص کرده‌اند که طراحی محدب در نرخ جریان بالا عملکرد بهتری دارد.[۲۵] دوان[۲۳] و همکاران (۲۰۲۰) با افزودن تثبیت‌کننده‌ی گردابه‌ی استوانه‌ای، افزایش ۵/۵٪ بازده برای ذرات ریز و کاهش نوسان‌های میدان جریان را گزارش کرده‌اند.[۲۶] وسیلفسکی و برار[۲۴] (۲۰۲۳)، نیز با تزریق هوای پاک محوری از سقف سیکلون، منجر به افزایش ۴/۷٪ در بازده جمع‌آوری و افزایش ۶٪ در افت فشار شده و قطر برش تا ۳۳/۶٪ را کاهش داده است.[۲۷]

در بخش جمع‌آوری، دهداری‌نژاد و همکاران (۲۰۲۳)، استفاده از مخروط جامد هیبریدی معکوس پیچ‌خورده (TIHSC)[۲۵] را در بخش جمع‌آوری ذرات اعمال کرده‌اند، که حالت بهینه باعث کاهش اندازه‌ی قطر برش ذرات از ۰/۹۷ به ۰/۸۵ میکرومتر برای جداسازی ۵۰٪ و از ۶/۲ به ۴/۷ میکرومتر برای جداسازی ۱۰۰٪ شده است، در حالی که افت فشار ۱۲/۷٪ کاهش یافته است.[۲۸] السابد[۲۶] و همکاران (۲۰۲۰)، با اصلاح ارتفاع، طول، و قطر محفظه‌ی پایین، بهترین نسبت‌ها را برای کاهش افت فشار معرفی کرده‌اند.[۲۹] پرواز و همکاران (۲۰۲۰)، با تحلیل هندسه‌های مختلف مجرای تخلیه نشان داده‌اند که طراحی مخروطی معکوس، بیشترین بازده را دارد.[۳۰] سان و همکاران (۲۰۲۴)، با ترکیب مجرای تخلیه و بخش جمع‌آوری ذرات، بازده را برای ذرات ریز افزایش داده‌اند.[۳۱] در

---

[3] Stairmand
[4] Barth
[5] Muschelknautz
[6] Reydon & Gauvin
[7] Meißner & Löffler
[8] Iozia & Leith
[9] Ramachandran
[10] Computational Fluid Dynamics
[11] Zhao
[12] Integrated Compact-Bends Cyclone
[13] Reynolds Stress Model
[14] Wasilewski & Brar
[15] Feng
[16] Fetuga
[17] Guo
[18] Slotted Vortex Finder
[19] Arc-shaped Cylinder Roof
[20] Kumar
[21] Pei
[22] Pandey & Brar
[23] Duan
[24] Wasilewski & Brar
[25] Twisted Inverted Hybrid Solid Cone
[26] Elsayed

پایان، پرواز و همکاران (۲۰۱۸)، با افزودن مخروط داخلی با ارتفاع مناسب، کاهش فرسایش، و کاهش افت فشار را گزارش کرده‌اند.[۳۲]

هدف پژوهش حاضر، بهبود عملکرد سیکلون با تمرکز بر کنترل جریان از طریق ترکیب اصلاحات هندسی در چهار ناحیه‌ی کلیدی، شامل: ورودی، بدنه، گردابه‌یاب، و بخش جمع‌آوری ذرات بوده است. برخلاف مطالعات پیشین، که اغلب فقط به بهینه‌سازی یک بخش پرداخته‌اند، در پژوهش حاضر به بررسی هم‌زمان و ترکیبی بخش‌های مذکور پرداخته شده است. ابتدا، شبیه‌سازی با هندسه‌ی پایه‌ی سیکلون به‌منظور اعتبارسنجی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده است. سپس، تأثیر هر تغییر مستقلاً بررسی و درنهایت، تحلیل ترکیبی تغییرات انجام شده است، تا مشخص شود آیا بین آن‌ها اثر هم‌افزایی وجود دارد یا خیر. استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در مطالعه‌ی حاضر، علاوه‌بر کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی، امکان ارزیابی دقیق عملکرد سیکلون را فراهم کرده است. پژوهش حاضر، با ارائه‌ی رویکردی نوآورانه و دقیق، توانسته است راهکارهای مؤثری برای طراحی سیکلون‌های نسل جدید با بازده بالا و افت فشار پایین در اختیار صنعت قرار دهد.

۲. سیکلون مبنا

در مطالعه‌ی حاضر، از یک سیکلون استیرمند[۲۷] به‌عنوان هندسه‌ی پایه برای شبیه‌سازی و تحلیل استفاده شده است. سیکلون‌ها به‌دلیل طراحی ساده و بازدهی بالا در جداسازی ذرات معلق، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف داشته و در بسیاری از مطالعات و پژوهش‌ها نیز استفاده شده است. هندسه‌ی سیکلون استیرمند به‌عنوان یکی از هندسه‌های استاندارد و پراستفاده در پژوهش‌ها انتخاب شده است. سیکلون استیرمند، به دلیل تعادل بهینه بین بازده جداسازی و افت فشار، در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان مرجع استفاده شده است. پارامترهای اصلی هندسه‌ی سیکلون، شامل: قطر بدنه، ارتفاع بخش استوانه‌ای، طول و عرض ورودی، قطر و ارتفاع خروجی گاز، و سایر ابعاد استاندارد آن است، که تمامی ابعاد مذکور، نسبتی از قطر اصلی بدنه‌ی سیکلون است. در شکل ۱، نمای کلی هندسه‌ی مذکور مشاهده می‌شود. همچنین، در جدول ۱، مقادیر دقیق ابعاد ذکرشده ارائه شده است.

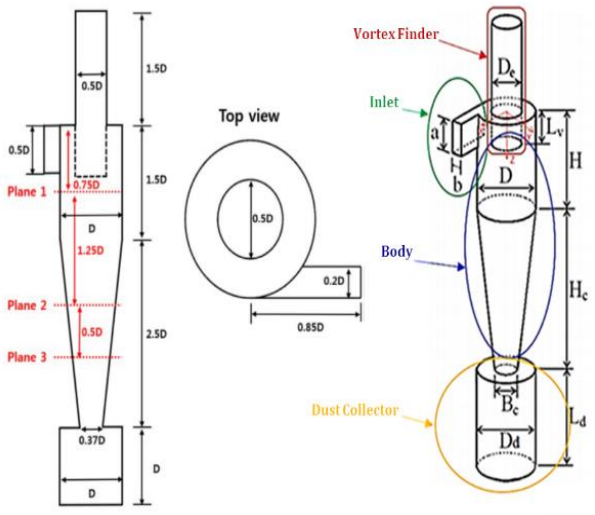

Figure 1. Schematic of the benchmark cyclone and its parameters geometric.

شکل ۱. نمایی از سیکلون مبنا و پارامترهای هندسی.[۳۴]

جدول ۱. ابعاد و هندسه‌ی سیکلون مبنا.[۳۳]

Table 1. Geometry of the benchmark cyclone.

Quantity	Value
D	290 mm
D_e/D	0.5
B_c/D	0.375
D_d/D	1
H/D	1.5
H_c/D	2.5
L_d/D	1
L_v/D	0.5
L_i/D	0.85
a/D	0.5
b/D	0.2

۳. معادله‌های حاکم

۳.۱. معادله‌های حاکم بر جریان

حرکت جریان سیال توسط معادله‌های ناویر استوکس، شامل: معادله‌های پیوستگی، اندازه‌ی حرکت، و انرژی است، که در پژوهش حاضر، از آثار دما و معادله‌ی انرژی صرف‌نظر شده است. جریان فاز پیوسته، تراکم ناپذیر فرض شده و برای جریان تراکم‌ناپذیر، معادله‌های ۱ و ۲ به‌دست آمده است.[۳۵ و ۳۶]

- **معادله‌ی بقای جرم**

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \qquad (1)$$

- **معادله‌ی اندازه‌ی حرکت**

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \qquad (2)$$

که در آن‌ها، u_i مؤلفه‌های میدان سرعت، p فشار استاتیک بر حسب پاسکال، ρ چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، t زمان بر حسب ثانیه، ν ویسکوزیته‌ی سینماتیکی سیال، و τ_{ij} تنش‌های رینولدز نامیده می‌شوند.

۳. ۲. معادله‌های حاکم بر مدل تنش رینولدز (RSM)

مدل تنش رینولدز (RSM)، مدلی است که قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار جریان گاز در سیکلون است.[۳۷ و ۳۸] مدل RSM، برخلاف سایر مدل‌ها، فرض همسانگردبودن آشفتگی را حذف و از معادله‌های انتقال برای هر یک از تنش‌های رینولدز استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با مدل RSM، تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارند و امکان پیش‌بینی دقیق الگوی جریان آشفته، پروفایل سرعت محوری و مماسی، قطر برشی، و افت فشار

[27] Stairmand

در سیکلون را فراهم می‌کنند. مطالعات مختلفی موفقیت کاربرد مدل اخیر را تأیید کرده‌اند و مدل RSM به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در سیکلون شناخته می‌شود و مدل توربولانسی هفت معادله‌ای تنش رینولدز بهتر از مدل‌های قبلی می‌تواند نتایج را پیش‌بینی کند. سایر مدل‌های RANS با این فرض صحیح هستند که آشفتگی همگن باشد، یعنی در تمام جهت‌ها، انتشار آشفتگی یکنواخت باشد؛ اما پیش‌فرض مذکور، مطابق با فیزیک جریان در سیکلون‌ها نیست. لذا مدل آشفتگی باید هم‌زمان، معادله‌های انتقال برای هر تنش رینولدز و معادله‌های نرخ اتلاف را حل کند؛ که در جریان سه‌بُعدی منجر به هفت معادله‌ی اضافی می‌شود، که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است:[۳۵]

$$\frac{\partial R_{ij}}{\partial t}+\overline{U_k}\frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k}=\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k}\right)-\left[R_{ik}\frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_k}+R_{jk}\frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_k}\right]- \left[c_1\frac{\varepsilon}{k}\left(R_{ij}-\frac{2}{3}\delta_{ij}k\right)+c_2\left(P_{ij}-\frac{2}{3}\delta_{ij}P\right)\right]-\frac{2}{3}\delta_{ij}\varepsilon \quad (3)$$

که در آن، $R_{ij}=\overline{\left(u_i'u_j'\right)}$ تانسور تنش رینولدز است. مدل RSM، معادله‌های انتقال دیفرانسیلی را برای ارزیابی مؤلفه‌های تنش به کار می‌برد؛ که درآن عبارت اول، در سمت راست تساوی، نفوذ و عبارت دوم، تولید آشفتگی است؛ که به‌صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود و عبارت سوم، کرنش فشاری و عبارت پنجم، نرخ اتلاف است، که در رابطه‌ی ۵ نشان داده شده است:[۳۵]

$$P_{ij}=-\left[R_{ik}\frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_k}+R_{jk}\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_k}\right],P=\frac{1}{2}P_{ij} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\overline{U_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)- c_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}R_{ij}\frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_j}-c_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

که در آن، k انرژی جنبشی آشفتگی، مؤلفه‌های سرعت جریان با u_j، و مختصات مکان با x_j تعیین می‌شوند. P به تولید انرژی آشفتگی، مانند اصطکاک اشاره دارد. در معادله‌های اخیر، $C_{\varepsilon 1}$، $C_{\varepsilon 2}$، C_1، C_2، σ_ε، و σ_k ضرایب ثابت هستند و مقدار آن‌ها به ترتیب ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۱/۸، ۰/۶، ۱/۲، و ۱ است.[۳۵]

۳. ۳ . معادله‌های حاکم بر فاز گسسته

در روش اویلری- لاگرانژی، ابتدا میدان جریان سیال با استفاده از معادله‌های ناویر- استوکس برای فاز پیوسته حل می‌شود، سپس مسیر حرکت ذرات فاز گسسته با مدل فاز گسسته (DPM)[۲۸] و بر پایه‌ی چارچوب مرجع لاگرانژی ردیابی می‌شود. در مدل ذکرشده، ذرات به‌صورت کروی، غیرچرخان، با غلظت رقیق و بدون برهم‌کنش متقابل در نظر گرفته می‌شوند و برخورد آن‌ها با دیواره‌ها، کاملاً الاستیک فرض می‌شود. با فرض کوپلینگ یک‌طرفه و بی‌تأثیری ذرات در جریان سیال، مسیر ذرات از طریق انتگرال‌گیری از معادله‌ی نیروها، شامل نیروی پسا و گرانش طبق قانون دوم نیوتن محاسبه می‌شود. روش مذکور، امکان تحلیل دقیق توزیع و رفتار ذرات درون سیکلون را فراهم می‌کند.

معادله‌ی حاکم بر حرکت ذرات در مدل فاز گسسته مطابق قانون دوم نیوتن مطابق رابطه‌ی ۶ است:[۳۰ و ۳۹]

$$\frac{du_{p,i}}{dt}=F_D\left(u_i-u_{p,i}\right)+g_i\left(\rho_P-\rho\right)/\rho_P+F_i/\rho_P \quad (6)$$

ترم‌های سمت راست معادله‌ی اخیر به ترتیب نشان‌دهنده‌ی نیروی پسا، نیروی گرانش، و نیروهای اضافی دیگر هستند. معادله‌ی ۶، در سه راستای مختصات به صورت روابط ۷ الی ۹ نوشته می‌شود:[۳۰ و ۳۹]

$$\frac{du_P}{dt}=F_D\left(u_i-u_P\right)+\frac{{v_P}^2}{r_o} \quad (7)$$

$$\frac{dv_P}{dt}=F_D\left(v-v_P\right)-\frac{u_Pv_P}{r_o} \quad (8)$$

$$\frac{dw_P}{dt}=F_D\left(w-w_P\right)-g \quad (9)$$

که در آن‌ها، u، v، و w به ترتیب سرعت سیال در سه جهت x، y، و z هستند و تمام پارامترها با اندیس P به معنای سرعت ذره و متعلق به ذره است. ترم‌های $\frac{{v_P}^2}{r_o}$ و $\frac{u_Pv_P}{r_o}$ به ترتیب، نشانگر اجزاء گریز از مرکز و شتاب ذره هستند. F_D که نیروی پسا بر واحد جرم ذرات است، نیز طبق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:[۳۰ و ۳۹]

$$F_D=\frac{18}{\rho_P{d_P}^2}\frac{C_DRe_P}{24} \quad (10)$$

که در آن، ρ_P و d_P به ترتیب چگالی و قطر ذره هستند. همچنین، Re_P عدد رینولدز ذره است، که به صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:[۳۰ و ۳۹]

$$Re_P=\rho\frac{\left|\overrightarrow{u_P}-\vec{u}\right|d_P}{\mu} \quad (11)$$

ضریب پسا وارد بر ذره، که با C_D نشان داده می‌شود، با توجه به محدوده‌ی عدد رینولدز در سه حالت مطابق رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود:[۳۰ و ۴۰]

$$C_D=\begin{cases}\frac{24}{Re_P}, & Re_P\le 1\\ \frac{24\left(1+0.15{Re_P}^{0.687}\right)}{Re_P}, & 1<Re_P\le 1000\\ 0.44, & Re_P>1000\end{cases} \quad (12)$$

۴. شبکه‌ی محاسباتی و اعتبارسنجی حل جریان

در بخش حاضر، شبیه‌سازی عددی سیکلون گازی استیرمند با هدف تحلیل دقیق رفتار جریان و ارزیابی عملکرد جداسازی ذرات انجام شده است؛ که برای دستیابی به آن، ابتدا هندسه‌ی سیکلون معرفی و سپس فرآیند شبکه‌بندی و شرایط شبیه‌سازی تشریح شده‌اند. در ادامه، برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی، استقلال از شبکه بررسی و سپس نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. در پایان نیز با تحلیل استقلال از تعداد ذرات، اعتبار شبیه‌سازی‌ها کاملاً ارزیابی شده است. هندسه‌ی سیکلون استفاده‌شده در پروژه‌ی حاضر، با حفظ نسبت‌های استاندارد طراحی و تمامی ابعاد به‌صورت پارامتریک و دقیق در

[28] Discrete phase model

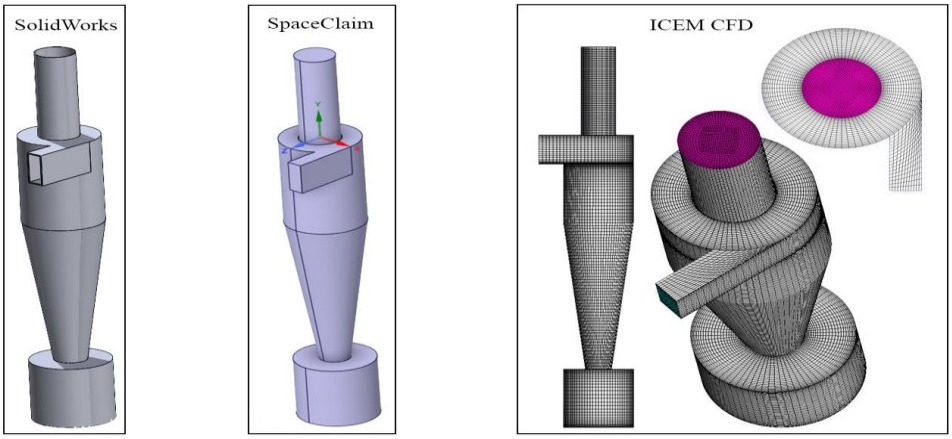

Figure 2. Cyclone geometry design (left), preparation of the cyclone geometry for simulation (middle), and structured computational mesh (right).

شکل ۲. طراحی هندسه‌ی سیکلون (سمت چپ)، آماده‌سازی هندسه‌ی سیکلون برای شبیه‌سازی (وسط)، و شبکه‌ی محاسباتی سازمان‌یافته (سمت راست).

جدول ۲. شرایط مرزی در مسئله‌ی سیکلون.

Tabe 2. Boundary conditions in cyclone problem.

Boundary	Boundary Condition Type	Description
Inlet	Velocity Inlet	Inlet velocity: 16.1 m/s; using hydraulic diameter and turbulence intensity
Outlet	Outflow	Natural outlet allowing flow to exit without additional constraints
Other surfaces	Wall	No-slip wall

نرم‌افزار سالیدورکس[۲۹] طراحی و ترسیم شده‌اند. همچنین، آماده‌سازی آن برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار اسپیس کلیم[۳۰] صورت گرفته است. سپس، هندسه‌ی سیکلون فرآیند شبکه‌بندی با استفاده از نرم‌افزار آیسم سی‌اف‌دی[۳۱] انجام شده است، و روند آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود، که مبنای اصلی برای شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت[۳۲] بوده است.

مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) با تابع دیواره‌ی استاندارد برای شبیه‌سازی جریان انتخاب شده است، زیرا قابلیت بالاتری در مدل‌سازی جریان‌های چرخشی و گردابه‌ای داخل سیکلون دارد. شرایط مرزی شامل ورودی با سرعت ۱۶/۱ متر بر ثانیه، خروجی آزاد، و دیواره‌ی بدون لغزش تعریف شده‌اند، که خلاصه‌ی آن در جدول ۲ ارائه شده است. انتخاب الگوهای گسسته‌سازی[۳۳]، تأثیر زیادی در نتایج شبیه‌سازی دارد. انسیس فلوئنت، حلگرهای بسیاری برای الگوهای گسسته‌سازی مختلف، کوپل فشار- سرعت، فشار، اندازه‌ی حرکت، انرژی جنبشی، و نرخ اتلاف انرژی جنبشی پیشنهاد می‌دهد. الگوی گسسته‌سازی سیمپل‌سی (SIMPLEC)[۳۴] برای کوپل فشار- سرعت استفاده شده است، که موجب همگرایی بهتری می‌شود. برای گسسته‌سازی فشار نیز از الگوی میانیابی پرستو (PRESTO)[۳۵] استفاده شده است، که یگانه الگویی است که با دقت می‌تواند پروفیل سرعت میانگین، توزیع فشار استاتیک، و افت فشار در سیکلون‌ها را با انطباق خوبی نسبت به داده‌های

جدول ۳. روش و تنظیمات حل عددی.

Table 3. The adjustments in the numerical method.

Variable	Selected Method	Description
Pressure–velocity coupling	Simple-C	Suitable for steady flow with fast convergence
Pressure discretization	PRESTO	Optimized for swirling flows
Momentum and kinetic energy	Second-Order Upwind	Higher accuracy for other variables
Reynolds stress	First-Order Upwind	Improves solver convergence

تجربی پیش‌بینی کند. برای گسسته‌سازی اندازه‌ی حرکت، انرژی جنبشی، و اتلاف توربولانس از الگوی مرتبه‌ی دو بالادست[۳۶] استفاده شده است. از الگوی گسسته‌سازی مرتبه‌ی اول بالادست[۳۷] برای معادله‌های تنش‌های رینولدز استفاده شده است، که در جدول ۳ ارائه شده است.[۴۰]

[29] Solid Works
[30] Space Claim
[31] ICEM CFD
[32] ANSYS Fluent
[33] discretization scheme

[34] Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent
[35] PREssure STaggering Option
[36] second-order upwind
[37] first-order upwind

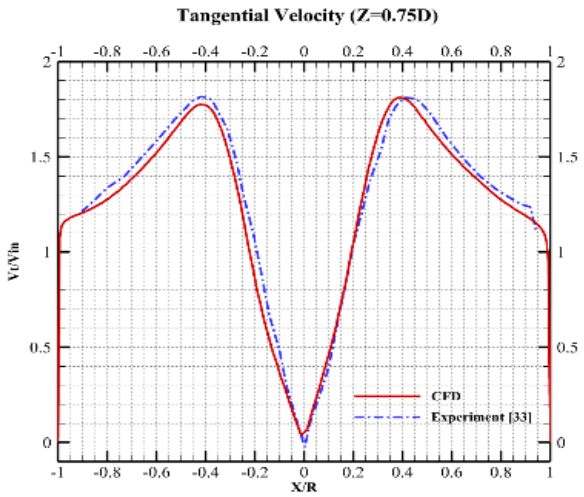

Figure 4. Validation of numerical results against experimental data for tangential velocity at the Z = 0.75D section.

شکل ۴. اعتبارسنجی نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی برای سرعت مماسی در مقطع Z=0.75D [۳۳].

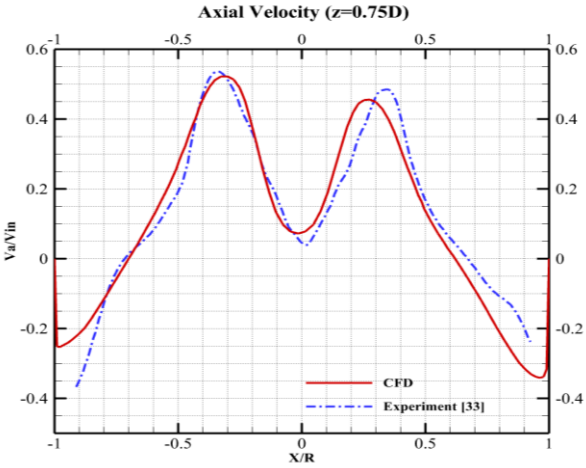

Figure 5. Validation of numerical results against experimental data for axial velocity at the Z = 0.75D section.

شکل ۵. اعتبارسنجی نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی برای سرعت محوری در مقطع Z=0.75D [۳۳].

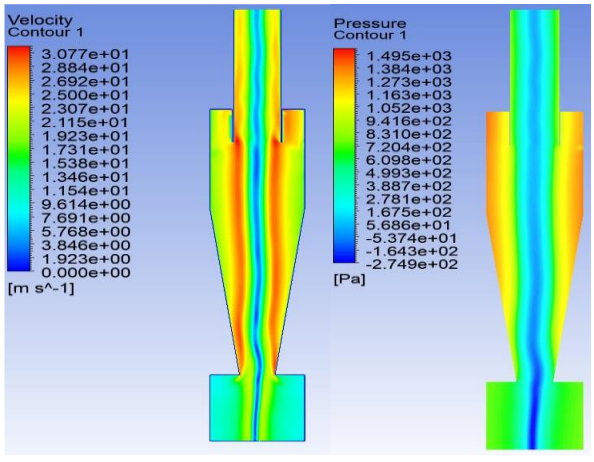

Figure 6. The velocity and pressure contour in the nominal condition.

شکل ۶. کانتور فشار و سرعت در حالت کارکرد نامی با هندسه‌ی مبنا.

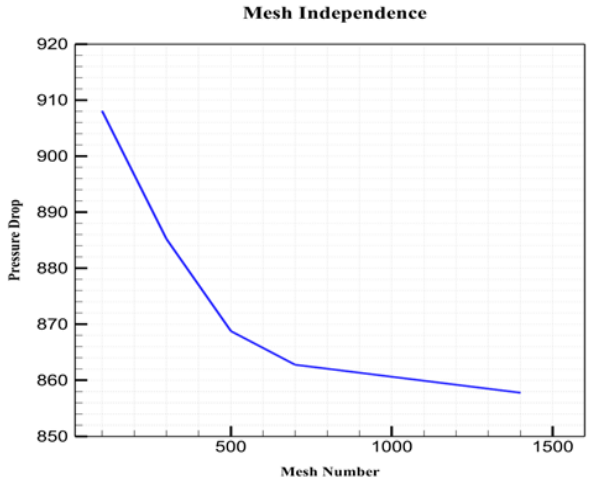

Figure 3. Grid-independence plot based on pressure drop criterion.

شکل ۳. نمودار استقلال از شبکه با معیار افت فشار.

در راستای اطمینان از درستی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، پیش از انجام فرآیند اعتبارسنجی، ابتدا تحلیل استقلال از شبکه انجام شده است. برای این منظور، هندسه‌ی سیکلون با شبکه‌هایی در اندازه‌های مختلف از ۱۰۰ هزار تا ۱/۴ میلیون سلول شبکه‌بندی و تغییرات افت فشار و سرعت محوری و مماسی در آن‌ها بررسی شده و نتایج نشان داده است که از نقطه‌ای به بعد (شبکه با حدود ۵۰۰ هزار سلول)، تغییرات افت فشار بسیار جزئی بوده و عملاً نتایج شبیه‌سازی به پایداری عددی رسیده‌اند (شکل ۳). بنابراین، شبکه با ۵۰۰ هزار سلول به‌عنوان شبکه‌ی بهینه در نظر گرفته شده و مبنای ادامه‌ی تحلیل‌ها قرار گرفته است.

پس از تثبیت ساختار شبکه، مرحله‌ی اصلی اعتبارسنجی با مقایسه‌ی نتایج عددی با داده‌های تجربی آغاز شده است. نخست، توزیع سرعت‌های مماسی و محوری در مقطع Z = 0.75D سیکلون ارزیابی شده است. این سرعت‌ها به‌صورت بی‌بُعد بر حسب نسبت شعاعی محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری‌شده از آزمایش تطبیق داده شده‌اند. تطابق بسیار مناسب بین داده‌های عددی و تجربی (شکل‌های ۴ و ۵)، توانایی مدل عددی در بازتولید رفتار چرخشی جریان درون سیکلون را تأیید کرده است.

علاوه بر آن، توزیع فشار و سرعت درون محفظه‌ی سیکلون نیز با استفاده از کانتورهای دوبُعدی تحلیل شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که بیشینه‌ی فشار در ناحیه‌ی ورودی و افت فشار قابل‌توجه در مرکز سیکلون به‌درستی توسط مدل پیش‌بینی شده است. همچنین نتایج تمرکز جریان در راستای محور مرکزی و گرادیان فشار شعاعی، شکل‌گیری ساختار گردابه‌ای پایدار و مکش مرکزی را به‌خوبی نشان داده‌اند (شکل ۶).

در مرحله‌ی بعد، برای بررسی دقت پیش‌بینی افت فشار، شبیه‌سازی‌ها در پنج سرعت ورودی مختلف، شامل: ۶، ۱۰، ۱۶/۱، ۲۰، و ۲۵ متر بر ثانیه انجام و نتایج با مقادیر تجربی مقایسه شده‌اند. نمودار مشاهده‌شده در شکل ۷، بیانگر انطباق مطلوب بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی است. همچنین، روند افزایشی افت فشار با افزایش سرعت ورودی به‌درستی توسط مدل عددی بازتولید شده است.

در ادامه‌ی فرآیند اعتبارسنجی، عملکرد سیکلون در جداسازی ذرات بررسی شده است. برای این منظور، سیکلون با قطر ۰/۳ متر، مطابق با شرایط فیزیکی

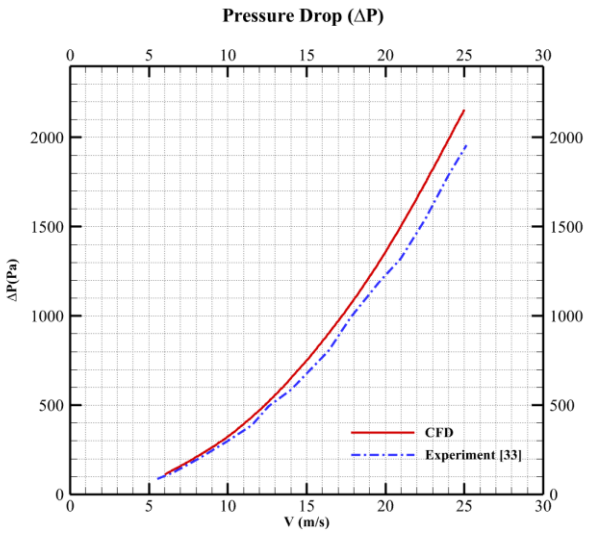

Figure 7. validation of the numerical simulation versus experimental data-pressure drop.

شکل ۷. مقایسه‌ی افت فشار به‌دست‌آمده از مطالعه‌ی آزمایشگاهی و حل عددی با شبکه‌ای حاوی ۵۰۰ هزار سلول.[۳۳]

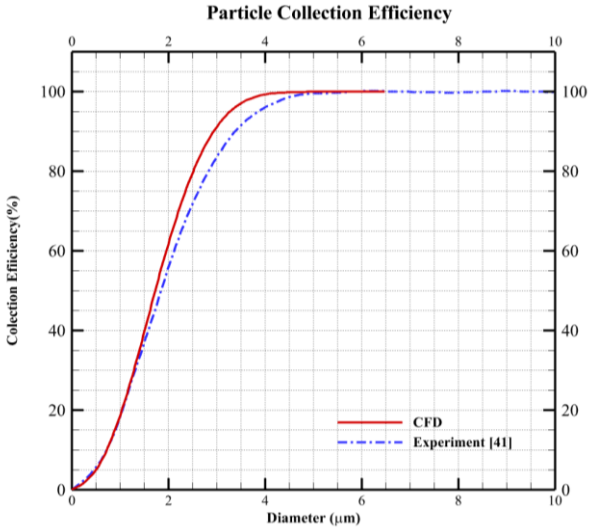

Figure 8. Validation of the numerical simulation versus experimental data-separation efficiency.

شکل ۸. مقایسه‌ی حالت آزمایشگاهی و حل عددی نمودار بازدهی جداسازی ذرات.[۴۱]

آزمایش‌های تجربی مرجع و با حفظ تمامی نسبت‌های هندسی طراحی و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از خواص پودر تالک انجام شده است. بازده جدایش برای ذرات در اندازه‌های مختلف محاسبه و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی انطباق مناسب بین دو مجموعه‌ی داده بوده و دقت مدل عددی در پیش‌بینی کارایی، جدایش ذرات را نیز تأیید کرده است (شکل ۸).

درنهایت، به‌منظور بررسی تأثیر تعداد ذرات در نتایج و حصول اطمینان از استقلال مدل از پارامتر مذکور، شبیه‌سازی‌ها با سه مقدار مختلف شامل ۲۸۸۰، ۲۸۸۰۰، و ۱۴۴۰۰۰ بسته ذره انجام شده‌اند.

نتایج منعکس‌شده در شکل ۹ نشان می‌دهد که پس از یک مقدار مشخص، افزایش بیشتر تعداد بسته‌ها تأثیر قابل‌توجهی در نتایج نداشته و مدل به

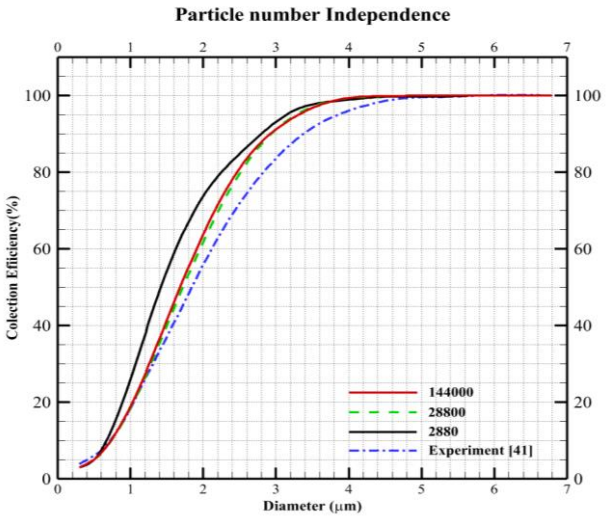

Figure 9. Independence study for the particle numbers in the benchmark cyclone.

شکل ۹. مطالعه‌ی استقلال از تعداد ذرات در حالت مبنا.

پایداری عددی رسیده است. یافته‌ی اخیر، همچنین استفاده از مدل کوپلینگ یک‌طرفه را از نظر دقت و کارایی محاسباتی تأیید کرده است.

در مجموع، مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی در سطوح مختلف تحلیل جریان و عملکرد جداسازی، نشان‌دهنده‌ی اعتبار بالای مدل عددی و تنظیمات اعمال‌شده در پژوهش حاضر است؛ که مبنای اطمینان‌بخشی برای استفاده از مدل شبیه‌سازی‌شده در ادامه‌ی پژوهش به‌منظور بررسی تغییرات هندسی و بهینه‌سازی عملکرد سیکلون است.

۵. نتایج اعمال تغییرات روی سیکلون

در بخش کنونی، تأثیر اعمال چهار تغییر هندسی به‌صورت مرحله‌ای در عملکرد سیکلون پایه‌ی استیرمند بررسی شده است. تغییرات به‌ترتیب در چهار بخش اصلی سیکلون، شامل: ورودی، گردابه‌یاب، بدنه، و بخش جمع‌آوری ذرات اعمال شده‌اند. هدف از تغییرات اخیر، کنترل بهینه‌ی جریان داخلی، کاهش آشفتگی، بهبود پایداری جریان، و افزایش احتمال برخورد ذرات با دیواره‌ها برای بهبود بازده جداسازی بوده است. برای این منظور، از مدل عددی اعتبارسنجی‌شده استفاده و پارامترهایی نظیر: بازده جداسازی، افت فشار، و قطر برش (d_{50}) در هر مرحله بررسی شده‌اند. در مرحله‌ی اول، استفاده از ورودی مارپیچی با زاویه‌ی ۳۶۰ درجه باعث افزایش هدایت جریان به دیواره‌ها شده و بازده جداسازی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است. در مرحله‌ی دوم، گردابه‌یاب با سقف انحنادار جایگزین نوع تخت شده و با یکنواخت‌سازی میدان جریان، افت فشار مرحله‌ی قبلی را کاهش داده است. در ادامه، افزودن تثبیت‌کننده‌ی گردابه به بدنه موجب کاهش نوسان‌ها و بهبود پایداری جریان مرکزی شده است.

در نهایت، با اعمال طراحی مخروط هیبریدی معکوس پیچ‌خورده در بخش جمع‌آوری ذرات، بازده جداسازی ذرات ریز افزایش و بازگشت ذرات جمع‌آوری‌شده به جریان اصلی کاهش یافته است. در شکل ۱۰، نمایی از چهار تغییر اخیر مشاهده می‌شود. اصلاحات اخیر به‌صورت جداگانه و ترکیبی ارزیابی شده و نتایج نشان داده است که هرکدام تأثیر مثبتی در عملکرد سیکلون داشته‌اند. اگرچه اثر برخی تغییرات در یکدیگر هم‌افزایی نداشته است، اما در

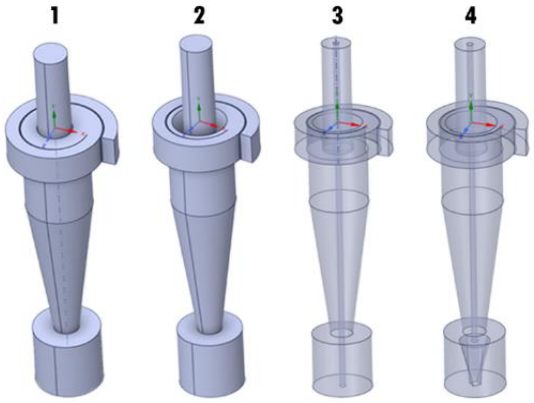

Figure 10. The evolution in the geometry of cyclone.

شکل ۱۰. نمایی از تغییرات مرحله‌ای سیکلون.

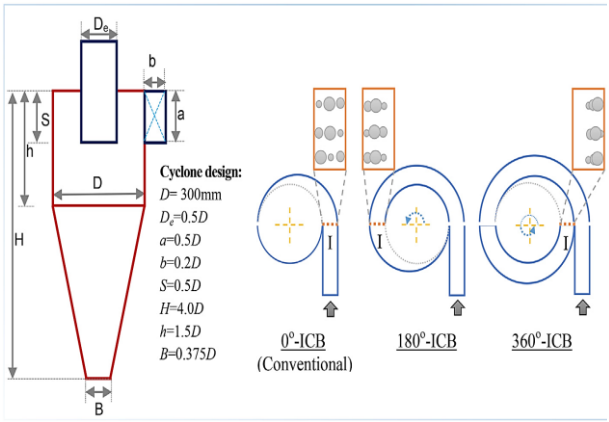

Figure 11. View of the cyclone with an integrated spiral inlet.

شکل ۱۱. نمایی از سیکلون با ورودی مارپیچی یکپارچه.[۱۳]

مجموع ترکیب آن‌ها منجر به افزایش کارایی سیکلون شده است. نتایج اخیر می‌تواند پایه‌ای برای طراحی‌های نوین در سیکلون‌های صنعتی باشد.

۶. تحلیل نتایج

در تحلیل نتایج، عملکرد سیکلون پایه‌ی استیرمند تحت تأثیر چهار تغییر هندسی مرحله به مرحله، شامل: ورودی، گردابه‌یاب، بدنه، و بخش جمع‌آوری ذرات، با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مقایسه با داده‌های تجربی بررسی شده است. هدف عبارت از بهبود بازده جداسازی، کاهش قطر برش، و حفظ افت فشار در محدوده‌ی قابل‌قبول بوده است.

۶. ۱. نتایج اعمال تغییرات در ورودی سیکلون

در بخش حاضر، تأثیر طراحی ورودی مارپیچی یکپارچه با زاویه‌ی چرخش ۳۶۰ درجه (ICBC) در عملکرد سیکلون پایه‌ی استیرمند بررسی شده است. طراحی مذکور که پیشتر توسط ژائو و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۳] پیشنهاد شده است، در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که هدایت بهتر جریان و ذرات به سمت دیواره‌ها، موجب افزایش بازده جداسازی به میزان ۱۱/۵۲٪ و کاهش قطر برش تا ۱۲/۱۴٪ شده است. شبیه‌سازی عددی، نتایج قابل‌توجهی در بهبود جداسازی ذرات ریز نشان داده است، هر چند افت فشار نیز به میزان ۲۲/۰۴٪ افزایش یافته است. با توجه به اهمیت جداسازی مؤثر ذرات ریز در بسیاری از فرآیندهای صنعتی، افزایش افت فشار ایجادشده در برابر بهبود بازده، قابل‌توجیه ارزیابی شده است. مرحله‌ی کنونی به‌عنوان گام ابتدایی در بهینه‌سازی گام‌به‌گام هندسه‌ی سیکلون انجام شده و مبنایی برای اصلاحات بعدی در سایر بخش‌ها

جدول ۴. نتایج تغییرات در هندسه‌ی ورودی سیکلون.

Table 4. Result for the change in the cyclone inlet geometry.

Performance Parameter	Base Case	New Value (Percentage Change (%))
Pressure drop (Pa)	1386.3	1691.91(+22.04%)
Separation efficiency (%)	76.35	85.15(+11.52%)
Cut-off diameter (μm)	1.73	1.52(–12.4%)

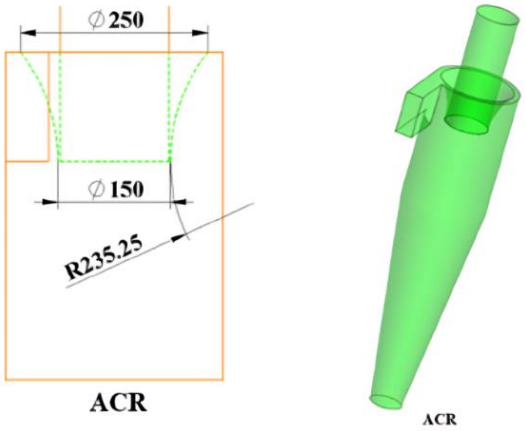

Figure 12. View of a cyclone with a curved vortex-finder.

شکل ۱۲ . نمایی از سیکلون با گردابه‌یاب انحنادار.[۲۰]

فراهم ساخته است. در شکل ۱۵ و جدول ۴، تغییرات بازده جداسازی بر حسب قطر ذرات و همچنین مقایسه‌ی مدل پایه و طراحی با ورودی مارپیچی ۳۶۰ درجه مشاهده می‌شود.

۶. ۲. نتایج اعمال تغییرات در گردابه‌یاب سیکلون

در مرحله‌ی دوم پژوهش، طراحی انحنادار برای گردابه‌یاب (ACR) به‌منظور کاهش افت فشار و بهبود پایداری جریان در کنار ورودی مارپیچی ۳۶۰ درجه بر روی سیکلون پایه‌ی استیرمند اعمال شده است. طراحی اخیر طبق شکل ۱۲ با الگوبرداری از مطالعه‌ی لی و همکاران (۲۰۲۲)،[۲۰] انتخاب شده است، که در آن بهبود ۲۴/۶۶٪ بازده و کاهش ۲۸/۵۸٪ افت فشار گزارش شده بود. نتایج شبیه‌سازی حاضر نشان داده است که بازده جداسازی نسبت به مدل پایه ۱۱/۷۲٪ افزایش یافته و قطر برش به ۱/۵۱ میکرومتر کاهش پیدا کرده است، اما بهبودی اخیر نسبت به مرحله‌ی قبلی (ورودی مارپیچی) تفاوت قابل‌توجهی نداشته است. در مقابل، افت فشار به میزان ۷/۴۹٪ نسبت به مدل ورودی مارپیچی کاهش یافته است، که به معنای جبران بخشی از افزایش افت فشار مرحله‌ی قبل بوده است. به‌طورکلی، این تغییر اگرچه بازده جداسازی را چندان افزایش نداده است، اما با بهبود یکنواختی جریان و کاهش افت فشار، نقش مثبتی در بهینه‌سازی عملکرد سیکلون ایفا کرده و زمینه را برای تغییرات بعدی در بدنه فراهم ساخته است. در شکل ۱۵ و جدول ۵، تغییرات بازده جداسازی نسبت به مدل پایه و تغییرات قبلی مشاهده می‌شود.

۶. ۳. نتایج اعمال تغییرات در بدنه‌ی سیکلون

در مرحله‌ی سوم پژوهش حاضر، تثبیت‌کننده‌ی گردابه‌ی میله‌ای به قطر ۰/۱ قطر اصلی سیکلون، که به انتهای سیکلون متصل شده است، افزوده شده است؛ که هدف از تغییر آن، کاهش نوسان‌های جریان در ناحیه‌ی مرکزی و بهبود

جدول ۵. نتایج تغییرات در گردابه‌یاب سیکلون.

Table 5. Result for the change in the cyclone vortex finder section.

Performance Parameter	Base Case	Previous Value	New Value (Percentage Change (%))	Percentage Change vs. Base Case (%)
Pressure drop (Pa)	1386.3	1691.9	15.15(–7.49%)	+12.9%
Separation efficiency (%)	76.35	85.15	85.31(+0.18%)	+11.72%
Cut-off diameter (μm)	1.73	1.52	1.51(–0.66%)	–12.71%

جدول ۶. نتایج تغییرات با افزودن میله‌ی تثبیت‌کننده.

Table 6. Result for the adding vortex stabilizer column.

Performance Parameter	Base Case	Previous Value	New Value (Percentage Change (%))	Percentage Change vs. Base Case (%)
Pressure drop (Pa)	1386.3	1565.15	1596.29(+1.98%)	+15.14%
Separation efficiency (%)	76.35	85.3125	86.3(+1.15%)	+13.02%
Cut-off diameter (μm)	1.73	1.51	1.39(–7.94%)	–19.65%

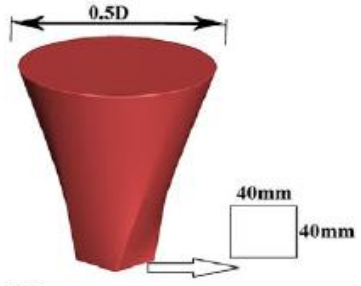

Figure 14. View of a twisted inverse hybrid solid cone (TIHSC).

شکل ۱۴. نمایی از مخروط جامد هیبریدی معکوس پیچ‌خورده (TIHSC).[۲۸]

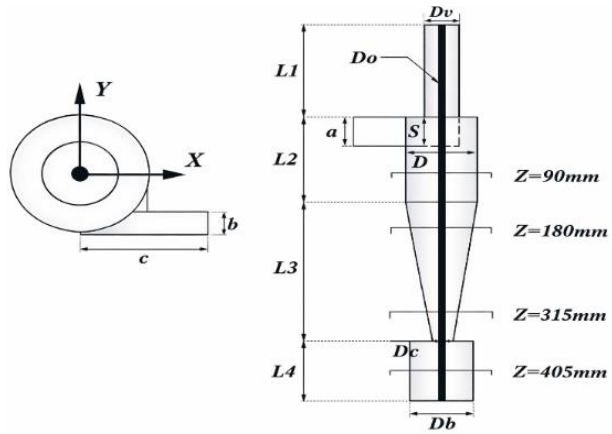

Figure 13. View of the cyclone with a vortex-stabilizing rod in the central region.

شکل ۱۳. نمایی از سیکلون با میله‌ی تثبیت‌کننده‌ی گردابه در ناحیه‌ی مرکزی.[۲۶]

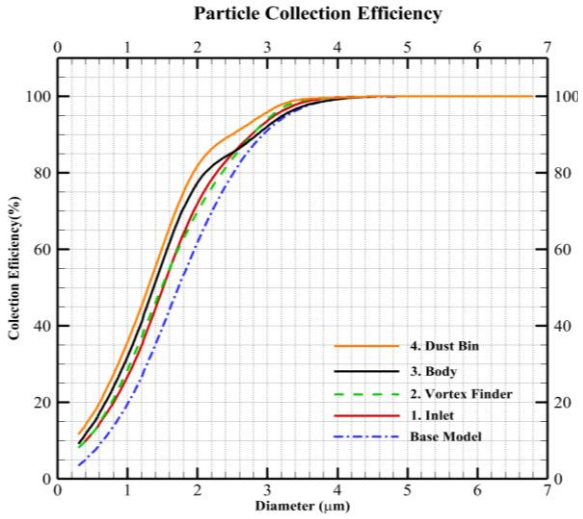

Figure 15. Comparison chart of the cumulative particle separation efficiency of each modification stage.

شکل ۱۵. نمودار مقایسه‌ی بازده جداسازی ذرات هر مرحله‌ی تجمیعی از تغییرات نسبت به مراحل پیش.

پایداری میدان جریان بوده است. براساس یافته‌های دوان و همکاران (۲۰۲۰)،[۲۶] تغییر مذکور طبق شکل ۱۳، عملکرد بهینه‌ای در تثبیت جریان و جلوگیری از افزایش افت انرژی داشته است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که با افزودن تثبیت‌کننده‌ی اخیر، بازده جداسازی نسبت به مدل پایه ۱۳/۰۲٪ افزایش یافته است، هر چند نسبت به تغییر قبلی فقط ۱/۱۵٪ بهبود داشته است. قطر برش نیز از ۱/۵۱ به ۱/۳۹ میکرومتر کاهش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی افزایش توانایی در جداسازی ذرات ریز بوده است. افت فشار نسبت به مدل پایه ۱۵/۴٪ افزایش یافته است، اما همچنان در محدوده‌ی قابل‌قبول باقی مانده است. به‌طورکلی، این تغییر با تثبیت ساختار جریان و بهبود یکنواختی توزیع فشار، نقش مؤثری در بهینه‌سازی عملکرد سیکلون ایفا کرده و مسیر را برای مرحله‌ی نهایی اصلاحات هموار ساخته است. در شکل ۱۵ و جدول ۶، تغییرات بازده جداسازی نسبت به مدل پایه و تغییرات قبلی مشاهده می‌شود.

۶. ۴. نتایج اعمال تغییرات در بخش جمع‌آوری ذرات سیکلون

در مرحله‌ی پایانی پژوهش حاضر، طراحی مخروط جامد هیبریدی معکوس پیچ‌خورده (TIHSC) طبق شکل ۱۴ در بخش جمع‌آوری ذرات سیکلون پایه‌ی استیرمند اعمال شده است. این طراحی که پیشتر توسط دهداری‌نژاد و همکاران (۲۰۲۳)،[۲۸] معرفی شده بود، با هدف کاهش بازگشت ذرات به جریان اصلی، کاهش افت فشار و افزایش بازده جداسازی به‌ویژه برای ذرات ریز انتخاب

جدول ۷. نتایج تغییرات با افزودن بخش مخروطی به محفظه‌ی جمع‌آوری ذرات.

Table 7. Result for the adding a conic in the dust bin section.

Performance Parameter	Base Case	Previous Value	New Value (Percentage Change (%))	Percentage Change vs. Base Case (%)
Pressure drop (Pa)	1386.3	1596.29	1584.84(–1.47%)	+13.45%
Separation efficiency (%)	76.35	86.3	89.24(+3.4%)	+16.87%
Cut-off diameter (μm)	1.73	1.39	1.3(–6.47%)	–24.85%

شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داده است که استفاده از TIHSC موجب افزایش بازده جداسازی به میزان ۱۶/۸۷٪ نسبت به مدل پایه و ۳/۴٪ نسبت به مرحله‌ی قبلی شده است. قطر برش نیز به ۱/۳ میکرومتر کاهش یافته است، که نسبت به مدل پایه، معادل ۲۴/۸۵٪ کاهش نشان داده است؛ که بیانگر بهبود چشمگیر در جداسازی ذرات کوچک است. همچنین، افت فشار نسبت به مرحله‌ی قبل ۱/۴۷٪ کاهش یافته است، اگرچه همچنان نسبت به مدل پایه، ۱۳٪/۴۵ افزایش داشته است، اما در محدوده‌ی قابل‌قبول باقی مانده است. نتایج اخیر نشان داده است که طراحی TIHSC علاوه‌بر حفظ مزایای مراحل پیشین، با تثبیت بیشتر جریان و افزایش جداسازی ذرات ریز، عملکرد کلی سیکلون را بهینه ساخته و تکمیل‌کننده‌ی فرآیند بهینه‌سازی مرحله به مرحله در چهار بخش اصلی سیکلون بوده است. در شکل ۱۵ و جدول ۷، تغییرات بازده جداسازی نسبت به مدل پایه و تغییرات قبلی مشاهده می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر اعمال چهار تغییر هندسی مرحله به مرحله در عملکرد سیکلون پایه‌ی استیرمند بررسی شده است. نتایج نشان داده است که طراحی ورودی مارپیچی ۳۶۰ درجه، بیشترین تأثیر را در افزایش بازده جداسازی (۱۱٪/۵۲) و کاهش قطر برش (۱۲/۱۴٪) داشته است، هر چند افت فشار را نیز تا ۲۲/۰۴٪ افزایش داده است. در مرحله‌ی دوم، استفاده از گردابه‌یاب انحنادار موجب کاهش افت فشار نسبت به مرحله‌ی اول شده است (۷/۴۹٪)، اما تأثیر چندانی در قطر برش نداشته است. در مرحله‌ی سوم، افزودن تثبیت‌کننده‌ی گردابه باعث بهبود پایداری جریان و کاهش قطر برش به ۱/۳۹ میکرومتر شده است، با افزایش ۱۵/۱۴٪ در افت فشار نسبت به مدل پایه، در نهایت، طراحی مخروط هیبریدی معکوس پیچ‌خورده بازده جداسازی را تا ۱۶/۸۷٪ افزایش و قطر برش را به ۱/۳ میکرومتر کاهش داده است، در حالی که افت فشار در محدوده‌ی قابل‌قبول باقی مانده است. نتایج اخیر نشان می‌دهد که ترکیب تغییرات اخیر می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد سیکلون منجر شود، هر چند آثار آن‌ها لزوماً خطی نبوده و در برخی موارد بیشتر موجب حفظ یا تقویت نتایج مراحل قبلی شده‌اند.

"فهرست علائم"

علائم انگلیسی

p	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
u_i	مؤلفه‌های میدان سرعت (ms^{-1})
R_{ij}	تانسور تنش رینولدز
Re_P	عدد رینولدز ذره
C_D	ضریب پسا وارد بر ذره
t	زمان (s)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
ϑ	لزجت سینماتیکی
k	انرژی جنبشی اغتشاشی
τ_{ij}	تنش رینولدز
δ_{ij}	ترم نرخ کرنش

References – منابع

1. Hoffmann, A.C. and Stein, L.E., 2007. Gas cyclones and swirl tubes: principles, design, and operation. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74696-6

2. Shepherd, C.B. and Lapple, C.E., 1940. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors cyclone without intel vane. *Industrial & Engineering Chemistry*, *32*(9), pp.1246-1248. https://doi.org/10.1021/ie50369a042

3. Leith, D. and Mehta, D., 1973. Cyclone performance and design. *Atmospheric Environment*, *7*(5), pp.527–549. https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90006-1

4. Dietz, P.W., 1981. Collection efficiency of cyclone separators. *Aiche Journal*, *27*(6), pp.888–892. https://doi.org/10.1002/aic.690270603

5. Stairmand, C.J., 1949. Pressure drop in cyclone separators. *Engineering*, *168*(4369), p.409.

6. Barth, W., 1956. Berechnung und auslegung von zyklonabscheidern auf grund neuer untersuchungen. *Brennstoff-warme-kraft*, *8*, pp.1–9.

7. Muschelknautz, E., 1972. Die berechnung von zyklonabscheidern für gase. *Chemie Ingenieur Technik*,*44*(1-2),pp.63–71. https://doi.org/10.1002/cite.330440112

8. Reydon, R.F. and Gauvin, W.H., 1981. Theoretical and experimental studies of confined vortex flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *59*(1), pp.14–23. https://doi.org/10.1002/cjce.5450590102

9. Meißner, P. and Löffler, F., 1978. Zur berechnung des strömungsfeldes im zyklonabscheider. *Chemie Ingenieur Technik*, *50*(6),pp.471–471. https://doi.org/10.1002/cite.330500619

10. Iozia, D.L. and Leith, D., 1989. Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency. *Aerosol Science and Technology*, *10*(3), pp.491–500. https://doi.org/10.1080/02786828908959289

11. Iozia, D.L. and Leith, D., 1990. The logistic function and cyclone fractional efficiency. *Aerosol Science and Technology*, *12*(3), pp.598–606. https://doi.org/10.1080/02786829008959373

12. Ramachandran, G., Leith, D., Dirgo, J. and Feldman, H., 1991. Cyclone optimization based on a new empirical model for pressure drop. *Aerosol Science and Technology*, *15*(2), pp.135–148. https://doi.org/10.1080/02786829108959520

13. Zhao, B., Wang, D. and Su, Y., 2019. Performance improvement of cyclone separator by integrated compact bends. *Powder Technology*, *353*, pp.64–71. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.004

14. Wasilewski, M. and Brar, L.S., 2019. Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, *213*, pp.19–33. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.023

15. Brar, L.S., Rahmani, F. and Wasilewski, M., 2024. Performance analysis of multi-inlet cyclone separators considering different shapes and locations of the inlet ducts. *Advanced powder technology*, *35*(2), pp.104325–104325. https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104325

16. Feng, M., Gui, C., Zhou, Y. and Lei, Z., 2024. Numerical study on performance optimization and flow mechanism of a new cyclone separator. *Green chemical engineering*. https://doi.org/10.1016/j.gce.2024.03.006

17. Fetuga, I.A., Olakoyejo, O.T., Abolarin, S.M., Adelaja, A.O., Ologunoba, S.O., Oluwatusin, O., Fetuata, O., Adewumi, O.O., Robinson, U.D. and Marcos, A., 2023. Eulerian–Lagrangian fluid dynamics study on the effects of inlet radial angle on the performance and flow pattern of multi-inlet cyclone separator. *Alexandria Engineering Journal*, *78*, pp.453–468. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.07.058

18. Guo, M., Xue, H., Pang, J., Le, D.K., Sun, X. and Yoon, J.Y., 2023. Numerical investigation on the swirling vortical characteristics of a Stairmand cyclone separator with slotted vortex finder. *Powder Technology*, *416*, pp.118236–118236. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118236

19. Li, W., Huang, Z. and Li, G., 2023. Improvement of the cyclone separator performance by the wedge-shaped roof: A multi-objective optimization study. *Chemical Engineering Science*, *268*, p.118404. https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118404

20. Li, W., Huang, Z., Li, G. and Ye, C., 2022. Effects of different cylinder roof structures on the vortex of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, *296*, pp.121370–121370. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121370

21. Kumar, V. and Jha, K., 2019. Multi-objective shape optimization of vortex finders in cyclone separators using response surface methodology and genetic algorithms. *Separation and Purification Technology*, *215*, pp.25–31. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.083

22. Pei, B., Yang, L., Dong, K., Jiang, Y., Du, X. and Wang, B., 2017. The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator. *Powder Technology*, *313*, pp.135–144. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.066

23. Yang, H., Wang, N., Cao, Y., Meng, X. and Yao, L., 2022. Effects of helical fins on the performance of a cyclone separator: A numerical study. *Advanced Powder Technology*, *34*(1), pp.103929–103929. https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103929

24. Zhou, F., Sun, G., Han, X., Zhang, Y. and Bi Wenqun, 2018. Experimental and CFD study on effects of spiral guide vanes on cyclone performance. *29*(12), pp.3394–3403. https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.09.022

25. Pandey, S. and Brar, L.S., 2022. On the performance of cyclone separators with different shapes of the conical section using CFD. *Powder Technology*, *407*, p.117629. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.11762

26. Duan, J., Gao, S., Hou, C., Wang, W., Zhang, P. and Li, C., 2020. Effect of cylinder vortex stabilizer on separator performance of the Stairmand cyclone. *Powder Technology*, *372*, pp.305–316. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.031

27. Wasilewski, M. and Brar, L.S., 2023. Performance analysis of the cyclone separator with a novel clean air inlet installed on the roof surface. *Powder technology*, *428*, pp.118849–118849.

https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118849

28. Dehdarinejad, E., Parvaz, F., Hosseini, S.H., Ahmadi, G. and Elsayed, K., 2023. Performance analysis of a gas cyclone with a dustbin inverted hybrid solid cone. *Aerosol Science and Technology*, *57*(9), pp.911–924. https://doi.org/10.1080/02786826.2023.2217873

29. Elsayed, K., Parvaz, F., Hosseini, S.H. and Ahmadi, G., 2020. Influence of the dipleg and dustbin dimensions on performance of gas cyclones: An optimization study. *Separation and Purification Technology*, *239*, pp.116553–116553. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116553

30. Parvaz, F., Hosseini, S.H., Elsayed, K. and Ahmadi, G., 2020. Influence of the dipleg shape on the performance of gas cyclones. *Separation and Purification Technology*, *233*, pp.116000–116000. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116000

31. Sun, Y., Yang, G., Shen, Q., Li, S., Yang, X., Zhang, G. and Sheng, Z., 2024. Numerical analysis of cyclone separators with unique dipleg structures at different dipleg-to-dustbin ratios. *Powder Technology*, *443*, pp.119904–119904. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119904

32. Parvaz, F., Hosseini, S.H., Elsayed, K. and Ahmadi, G., 2018. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, *201*, pp.223–237. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.001

33. Hoekstra, A.J., 2000. Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators.

34. Jang, K., Lee, G.G. and Huh, K.Y., 2018. Evaluation of the turbulence models for gas flow and particle transport in URANS and LES of a cyclone separator. *Computers & Fluids*, *172*, pp.274–283. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.04.032

35. Soliman, M.M., Yasser El-shaer, Elsayed, K. and Ibrahim, M.A., 2025. Performance enhancement of gas cyclone with streamlined ports using CFD simulations. *Journal of Engineering and Applied Science*, *72*(1). https://doi.org/10.1186/s44147-024-00575-8

36. Jefri Lim, A.D.L. and Abu Bakar, S.A., 2025. Effects of air vortex finder length and outlet diameter variations on oil palm loose fruit collector. *Journal of Engineering Research and Education (JERE)*, *16*, pp.76–87. https://doi.org/10.58915/jere.v16.2024.1514

37. Cen, Z.L., Zhao, J.G. and Shen, B.X., 2014. A comparative study of omega rsm and rng k-ε model for the numerical simulation of a hydrocyclone. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-international English Edition*, *33*(3), pp.53–61. https://doi.org/10.30492/ijcce.2014.11331

38. Corrêa, R.G., Andrade, J.R. and José, F., 2023. Improving separation prediction of cyclone separators with a hybrid URANS-LES turbulence model. *Powders*, *2*(3), pp.607–623. https://doi.org/10.3390/powders2030038

39. Misiulia, D., Antonyuk, S., Andersson, A.G. and Lundström, T.S., 2020. High-efficiency industrial cyclone separator: A CFD study. *Powder Technology*, *364*, pp.943–953. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.064

40. Brar, L.S., Sharma, R.P. and Elsayed, K., 2015. The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone. *Powder Technology*, *286*, pp.668–677. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.003

41. Zhao, B., 2005. Development of a new method for evaluating cyclone efficiency. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *44*(4), pp.447–451. https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.06.007